

wbv Publikation



Wozu Labor? Zur vernachlässigten Erkenntnistheorie hinter der Labordidaktik

von: Berendes, Jochen; Gutmann, Mathias

DOI: 10.3278/6004804w035

Erscheinungsjahr: 2020

Schlagworte: Erkenntnistheorie, Fortschritt, Labor, Labordidaktik, Technik, Wissenschaftstheorie

Der vorliegende Beitrag beleuchtet die Struktur und Funktion forschender Laborpraxis vor dem Hintergrund verschiedener erkenntnis- und wissenschaftstheoretischer Positionen. Das Labor kann in seiner Relevanz unterschätzt werden - mit Blick auf die darin verrichteten praktischen Tätigkeiten, auf dabei erforderliche Urteilsbildungen und nicht zuletzt auf unverzichtbare Impulse für die Wissenschaft. Die abstrakte Gegenüberstellung von Theorie und Praxis ist aufzugeben. Zugleich sollte Wissenschaft weder allein über das Labor noch über die Theoriebildung bestimmt werden. Abschließend plädiert der Beitrag dafür, die skizzierten Fragestellungen in die Labordidaktik sowie in die Planung und Durchführung von Lernlaboren einzubeziehen.

Diese Publikation ist unter folgender Creative-Commons-Lizenz veröffentlicht:



Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>



WIR MACHEN INHALTE SICHTBAR

Wozu Labor? Zur vernachlässigten Erkenntnistheorie hinter der Labordidaktik

JOCHEN BERENDES, MATHIAS GUTMANN

Abstract

Der vorliegende Beitrag¹ beleuchtet die Struktur und Funktion forschender Laborpraxis vor dem Hintergrund verschiedener erkenntnis- und wissenschaftstheoretischer Positionen. Das Labor kann in seiner Relevanz unterschätzt werden – mit Blick auf die darin verrichteten praktischen Tätigkeiten, auf dabei erforderliche Urteilsbildungen und nicht zuletzt auf unverzichtbare Impulse für die Wissenschaft. Die abstrakte Gegenüberstellung von Theorie und Praxis ist aufzugeben. Zugleich sollte Wissenschaft weder allein über das Labor noch über die Theoriebildung bestimmt werden. Abschließend plädiert der Beitrag dafür, die skizzierten Fragestellungen in die Labordidaktik sowie in die Planung und Durchführung von Lernlaboren einzubeziehen.

Schlüsselwörter: Labor, Erkenntnistheorie, Wissenschaftstheorie, Technik, Fortschritt, Labordidaktik

1 Das Labor – ein Arbeitsraum

Was stellen wir uns üblicherweise heute unter einem Labor vor? Es ist ein räumlich bestimmter Ort. Ein Labor hat Grenzen, die Innen und Außen voneinander trennen. Das Labor darf nur von qualifizierten Personen betreten werden, vielleicht in Schutzkleidung, und es kann verlassen werden, vielleicht nur unter besonderen Sicherheitskontrollen. Das Labor ist ein mehr oder minder gesicherter Ort, ein Ort der kunstvollen Reduktion, der gezielten Ausgrenzung störender Faktoren. Die verschiedenen ausgeprägten Regulationen und Abschirmungen von außen haben dabei etwas Thesenhaftes; sie enthalten begründete Annahmen über die wechselhaften Faktoren, die der intendierten Labortätigkeit abträglich sein könnten, wie etwa schwankende Temperaturen, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, elektromagnetische Felder, Staubpartikel. Einige äußere Einflussfaktoren – etwa die Einwirkung der Gravitation oder das Eintreffen von Neutrinostrahlen – entziehen sich der Verfügung, da sie nicht oder nur mit größtem Aufwand von einem Labor fernzuhalten sind. Ob alle Faktoren und

¹ Die Ausarbeitung dieses Beitrags wurde im Rahmen des Projekts SKATING aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01PL11014 unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Kräfte, die auf ein Labor einwirken können, bekannt sind und in ihrer Auswirkung beurteilt werden können, ist grundsätzlich fraglich, doch ist dies in der Regel kein Anlass, den Erkenntnisanspruch des Labors einzuschränken.

Neben der Kontrolle von Rahmen- und Anfangsbedingungen (vgl. Janich, 1995) bietet die räumliche Grenze des Labors zugleich den Schutz der Außenwelt vor den möglichen intendierten oder nicht intendierten Prozessen und Gefahren, vor allem für Gesundheit und Umwelt, die im Labor entstehen können. Die räumliche Grenze und die technische Ausstattung des Labors sind *funktional* auf die Bestimmung dessen ausgerichtet, was an diesem Ort getan werden kann, darf und soll.

Die räumliche Bestimmung des Labors kann aber auch fraglich sein. Albert Einstein soll auf die Frage nach seinem Labor einen Bleistift hervorgezogen haben (vgl. Lars Jaeger, 2015, S. 265): als Minimalvariante eines Labors, die den kognitiven Aspekt des Laborierens und das Gedankenexperiment hervorhebt, empirische Untersuchungen und technische Apparaturen aber zunächst beiseite stellt. Als Maximalvariante eines Labors könnten erste Atombombentests angeführt werden, sofern diese durchgeführt wurden, ohne Sicherheit zu haben, ob die ausgelöste Kettenreaktion überhaupt zu einem Abschluss kommen würde. Im Zuge der *Digitalisierung* entstehen neue Formen digitaler Labore, die als reine Simulationen im Prinzip an jedem Ort mit einem Computer genutzt werden können oder die von jedem Ort Zugriff auf einen realen Versuchsaufbau erlauben (vgl. Franuszkiewicz u. a., 2019; Terkowsky u. a., 2019). Damit wird der räumliche Rahmen des Labors entgrenzt und experimentelles Arbeiten dezentral ermöglicht. Der digitalen Nivellierung des Raumes steht die regelrecht feudale Besetzung von Orten durch eine einzige Experimentierapparatur entgegen, welche die mit ihr verbundenen Netze herrisch zentralisiert – wie etwa das CERN/LHC in der Nähe von Genf.

Hilfreich ist es, einige wichtige Funktionen und Typen von Laboren umrisshaft zu skizzieren: die Präparation von Phänomenen für die Erkenntnis von Prozessen und Gesetzmäßigkeiten und ihre Überprüfung im *Forschungslabor*, die problemorientierte Verwendung von Wissen und Kenntnissen im *Entwicklungslabor*, die Einübung und Vermittlung von Wissen und Kompetenzen im *Lernlabor* und seinen Varianten (vgl. Tekkaya u. a., 2016, S. 31–32) sowie die *Analyse* oder *Produktion von Stoffen*. Im Folgenden werden wir uns auf die Grenze zwischen Forschungs- und Lernlabor konzentrieren, um diese Unterscheidung letztlich auch zu verstören.

2 Das Experiment

Das Labor ist ein künstlicher Ort, an dem Nichtnatürliches auf kunstfertige Weise geschieht, um re-konstruierend zu erschließen, was „naturgemäß“ der Fall zu sein scheint. Was in diesem abgezielten Raum *experimentell* erarbeitet wird, soll draußen von weitreichender Bedeutung sein; was hier erarbeitet wird, erhebt den Anspruch universeller *Geltung*, soll verbindliche Erkenntnis für hier und dort, jetzt und zukünftig, darstellen. Die Erzeugung und Erzwingung von Verlaufstypen – das Expe-

riment oder Experimentalsystem (vgl. Rheinberger, 2001), das im Labor beheimatet ist – gleicht in dieser Hinsicht einer Maschine, die etwas immer wieder auf eine bestimmte Weise hervorzubringen hat (vgl. Tetens, 1987). Die künstlich arrangierende Intervention durch das Experiment, verbunden mit erheblicher Investition, wird seit dem 16. Jahrhundert nicht mehr als Verstoß gegen eine natürlich-göttliche Ordnung verstanden, sondern als ein notwendiges Instrument, *innerhalb* umfassender Naturgesetze diese selbst zu erschließen. Nicht die Natur wird beobachtet, sondern beobachtet werden die Ergebnisse methodisch arrangierter und konstruierter Vorgänge. „So finden wir zum Beispiel nirgends im Laboratorium die ‘Natur’ und die ‘Realität’, die von so kritischer Bedeutung für das deskriptive Modell [von Wissenschaft] ist. Das meiste, mit dem Wissenschaftler im Labor zu tun haben, ist hochgradig vorstrukturiert, wenn nicht zur Gänze artifiziell. [...] Die Natur scheint im wissenschaftlichen Labor nicht auf, es sei denn, man definiert sie von vornherein als das Produkt wissenschaftlicher Arbeit“ (Knorr Cetina, 2016, S. 23). Im Vergleich zur Natur ist das vorliegende Präparat oder der isolierte Prozess eine Abstraktion, das auf der Grundlage abstrahierenden Denkens die Natur repräsentiert bzw. im Labor als ein intentional zugerichtetes *Modell* der Natur fungiert.

Naturwissenschaftliches Beobachten zielt immer auf etwas ab, einen Vorgang oder Zustand, der beobachtet werden soll. Hierbei spielen Messgeräte eine wesentliche Rolle, deren Funktionsfähigkeit schon vor der Messung sichergestellt sein muss, was selbst für eine einfache Waage gilt. Durch Beobachten stellen wir im Labor also nicht einfach fest, was der Fall ist, sondern bringen das, was wir an provozierten Phänomenen wahrnehmen, in eine gemessene Form.

Dieses Moment des präparativen Erarbeitens finden wir, wegen der Technikstützung von Wissenschaften, in besonderer Weise im Labor: Wir präparieren, beseitigen alles, was das Phänomen stört – und *stellen* es auf diese Weise, wie der Jäger das Wild; gleichwohl nicht ohne Kosten, denn wir laufen Gefahr, unser Handeln und die Totalität allein aus dieser handlungstheoretischen Sicht zu erfassen.

3 Erkenntnistheorie

Skizzieren wir zunächst ausgewählte und einander überbietende Modelle zur Beschreibung naturwissenschaftlicher Erkenntnis. Der Positivismus vertritt die Ansicht, dass die von den Naturwissenschaften anerkannten Aussagen wahr sind, denn die *Induktion* schreite von einzelnen Messungen im Labor und wahren Protokoll- oder Beobachtungssätzen zur Bestimmung von Gesetzmäßigkeiten linear aufwärts. Aussagen mit umfassendem Anspruch sind dann und nur dann sinnvoll, wenn sie auf diesem Weg empirisch belegt sind (vgl. Carnap, 1998; Stegmüller, 1978, S. 346–428).

Anfragen an diesen strengen linearen Aufstieg zielen auf unvermeidliche *Zirkularitäten*. Ist es möglich, neutrale, theoriefreie Basis- oder Protokollsätze zu formulieren? Fließt nicht in jede Beobachtung und in jeden Beobachtungssatz bereits techni-

sches Wissen ein, und zwar durch den Handelnden und durch die eingesetzten (Mess-)Geräte? Ein grundsätzlicher Einwand zielt auf den Status der empirischen *Daten*, denn trotz ihres Namens werden diese weder *gegeben* (lat. *dare* für *geben*) noch gefunden oder erhoben, sondern *erzeugt*.

Hinzukommt, dass empirische Erkenntnis nie zu einer völligen Sicherheit gelangt, wie dies vielleicht für mathematische oder logische Schlüsse gelten kann. Denn es sind nur endlich viele Ereignisse experimentell beobachtbar, und dies erlaubt nicht den Schluss auf eine Theorie, die den Anspruch erhebt, alle relevanten möglichen Ereignisse zu beschreiben: „[...] noch so viele wahre Prüfaussagen könnten die Behauptung nicht rechtfertigen, eine erklärende allgemeine Theorie sei wahr“ (Popper, 1984, S. 7).

Auch die Formulierung eines Naturgesetzes bezieht sich auf eine Kette von Beobachtungen, die nicht ohne Technik und technischem Sachverstand erzeugt und auch nicht theoriefrei artikuliert werden können. Die Formulierung beruht u. a. auf der Erzeugung von Daten sowie ihrer statistischen Auswertung, Darstellung und Interpretation. Die Interpretation der Datensätze kann dabei durch Annahmen und Hypothesen gefördert und strukturiert werden. „Nicht selten werden nämlich scheinbar offenkundige Muster in den Daten erst wahrgenommen, nachdem man unter der Anleitung einer Hypothese das Augenmerk gezielt darauf richtete“ (Carrier, 2017, S. 57).

Angesichts endlicher Datensätze ist ein rein induktiver Beweis nicht möglich, sondern nur der Nachweis, dass die formulierte Gesetzmäßigkeit auch widerlegt, also falsifiziert werden kann, denn *„die Annahme, bestimmte Prüfaussagen seien wahr, rechtfertigt manchmal die Behauptung, eine erklärende allgemeine Theorie sei falsch“* (Popper, 1984, S. 8, Hervorh. im Original). Um es an einem bekannten Beispiel zu erläutern: Die zuverlässige, wiederholbare Beobachtung eines schwarzen Schwans erlaubt der Aussage zu widersprechen, alle Schwäne seien weiß. Wenn ein formuliertes Gesetz durch ihm widersprechende Beobachtungen widerlegt wird, kann an dessen Stelle eine neue, bessere Aussage treten, die wiederum ihrer zukünftigen Ablösung harrt. Wissenschaft befindet sich daher approximativ und kumulativ auf einem Weg zur Wahrheit. Wird wissenschaftliche Erkenntnis so dargestellt, folgt daraus, dass es jederzeit möglich ist, relevante (wiederkehrende) Beobachtungen zu treffen, die selbstverständliche Annahmen perturbieren.

Stellt der auf David Hume (1711–1776) zurückgehende Einspruch gegen empirische Wahrheitsnachweise bereits eine Herausforderung dar (Hume, 2015), so lässt sich dieser Einspruch noch weiter zuspitzen. Denn Abweichung und Anomalie sind bei Karl Popper als Randphänomene begründete und zwingende Anlässe, sich von Theorien zu lösen. Wie aber, wenn empirische Forschung stets verbunden ist mit der Wahrnehmung von Anomalien? Durch prompten Einspruch käme die Theoriebildung stets zum Abbruch. Wie aber, wenn die Naturwissenschaften sich nicht kontinuierlich durch Ansammlung von Erkenntnissen weiterentwickeln, sondern komplexe Umbrüche, Paradigmenwechsel (vgl. Kuhn, 1989), durchlaufen – Umbrüche, bei denen nicht selbstverständlich das überkommene Wissen erneut integriert wird?

Paul Feyerabend, Ian Hacking und andere bieten jedenfalls zahlreiche Beispiele aus der Geschichte der Naturwissenschaften an, die aufweisen, dass Theorien sich erfolgreich etablieren können, obwohl empirische Widersprüche und abweichende Daten von Anbeginn vorliegen. Paul Feyerabend schreibt zugespitzt und grundsätzlich, dass „*keine einzige Theorie jemals mit allen bekannten Tatsachen auf ihrem Gebiet übereinstimmt*“ (Feyerabend, 1993, S. 71, Hervorh. im Original). Entsprechend äußert sich auch Ian Hacking: „Theorien werden generell nicht einfach deshalb abgelehnt, weil sie Anomalien aufweisen, noch werden sie im allgemeinen schlicht deshalb akzeptiert, weil sie empirisch bestätigt sind“ (Hacking, 1996, S. 36).

Die Anomalie wäre demnach nicht die Ausnahme, sondern nahezu die Regel. Die Akteure der Naturwissenschaften wären demnach stets schon darin geübt, gleichsam im Augenwinkel einen schwarzen Schwan als Anomalie wahrzunehmen, sich durch diese Beobachtung aber in ihren Forschungsanliegen nicht verstören zu lassen. Diese Kompetenz, Abweichungen ausblenden oder aufschieben zu können, kann auch eine Kompetenz genannt werden, Beobachtungen zu gewichten, zu kontextualisieren, zu beurteilen und womöglich durch Hilfhypothesen zu integrieren. So könnten wir *entscheiden*, auf dem Weißsein von Schwänen zu bestehen und schwarze Tiere aus der Klasse „Schwan“ *per definitionem* zu entfernen; wir könnten auch die Klasse „Schwan“ erweitern, indem wir „X ist weiß oder schwarz“ erlauben oder unter Absehung von der Gefiederfarbe womöglich (züchterisch gedacht) durch das Kriterium „kreuzt sich erfolgreich mit anderen Schwänen“ ergänzen.

4 Über Ergebnisse sprechen und schreiben

Das Selbstverständnis der in der Wissenschaft Tätigen zeigt sich in der Art, wie gehandelt, gesprochen und geschrieben wird. Nehmen wir relevante divergierende Äußerungskontexte (Fachzeitschriften, Handbücher, Lehrbücher, populäre Darstellungen, Forschungsanträge etc.), so ist plausibel, dass die Geltungsansprüche der *Ergebnisse* empirischer Forschung, der Modus der Wahrheitsansprüche und der Bezug auf Daten und Methoden nicht stets in gleicher Weise signalisiert werden. Die Sicherheit und Unsicherheit von Aussagen wären mit den Ausdrücken *wahr* oder *falsch* auch nur unzureichend abgebildet. Ein paar mögliche Äußerungen, schriftlich oder mündlich, könnten etwa lauten: „Es gilt a.“ „Da W und V gelten, gilt auch a.“ „Es gilt angesichts der Daten a.“ „Da W und V gelten, müsste auch a gelten.“ „Seit t wissen wir, dass a.“ „Wir gehen heute davon aus, dass a.“ „Es wurde nachgewiesen, dass a.“ „Wir haben gezeigt, dass a.“ „Vieles deutet daraufhin, dass a.“ Auf verschiedene Weise wird die Sicherheit der Aussage hier eingeschränkt oder Bezug genommen auf einen temporalen Aspekt, eine Forschergruppe oder vorausgesetztes Wissen. Äußerungskontexte erfordern häufig Formen elliptischer Rede. Die wechselseitige Unterstellung von Wissen im Kreis der Forschungsgemeinschaft scheint legitim und unvermeidbar; doch wäre es eine schwierige, aufschlussreiche Übung, solche Aussagen sich unverkürzt – mit präziser Aufzählung aller Voraussetzungen und Annahmen – vorzustellen.

Karin Knorr Cetina weist darauf hin, dass in einem Labor von *Wahrheit* ohnehin kaum die Rede sei, sondern prägnanterweise von mehr oder minder funktionierender Technik. Es gehe darum, „[...] Dinge zum Laufen zu bringen (*to make things work*). Die Beschäftigung damit, ob ein Versuch ‘läuft’, ‘geht’ oder ‘nicht geht’ und wie er zum Funktionieren gebracht werden kann, weist eher auf Erfolg als auf Wahrheit als handlungsleitendes Prinzip von Forschungsarbeit hin“ (Knorr Cetina, 2016, S. 24). Das heißt, es gibt in diesem Zusammenhang zwei Sprachspiele: Auf einer basalen technischen Ebene herrscht die Opposition *funktioniert* – *funktioniert nicht* vor, auf der Ergebnisebene ist die Opposition *wahr* – *falsch* bestimmend. Den schwierigen Übergang von der Laborpraxis zu einem Bericht schildert kritisch Ludwik Fleck, denn die in der Entstehung relevanten Wissensbestände und Fertigkeiten kommen dabei nicht zum Ausdruck: „Der zusammengefaßte Bericht über ein bearbeitetes Gebiet enthält immer nur einen sehr kleinen Teil der betreffenden Erfahrung des Forschers und zwar nicht den wichtigsten [...]. Es ist so als ob nur der Text eines Liedes angegeben wird, nicht aber die Melodie“ (Fleck, 1980, S. 126). Der Bericht unterschlägt die zugrundeliegende vielseitige Laborpraxis und Laborerfahrung. Er erlaubt kaum noch Rückschlüsse auf diese. Auch darum verdient es das Labor, selbst Gegenstand von Forschung zu sein.

5 Zugewiesene Funktionen des Labors im Kontext der Methodendiskussion

Die Bedeutung der Labortätigkeit kann im Kontext der Wissenschaft verschieden gewichtet und gewertet werden. Wenn das Labor auch einerseits als Inbegriff neuzeitlicher Wissenschaft verstanden wird, so steht es doch andererseits in dem kulturell verankerten Abwertungsmechanismus, der praktisches und handwerkliches Arbeiten gegenüber theoretischer Arbeit herabsetzt (vgl. Arendt, 1989; Janich, 2015), und diese Abwertung wird zusätzlich gestützt, wenn die *hypothetisch-deduktive Methode* in den zunehmend theorieorientierten Naturwissenschaften seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts dominant geworden ist, wovon Zweige der Wissenschaftstheorie ausgehen (vgl. Carrier, 2017, S. 35–39). Empirische Beobachtungen und Experimente im Labor haben nur noch eine zugewiesene untergeordnete Funktion gegenüber den aus dem Theoriegebäude abgeleiteten Hypothesen. Labore überprüfen, belegen, weisen nach, doch sie entdecken nicht – oder kaum. „Das Experiment wird reduziert auf eine Instanz zur Überprüfung von Hypothesen. Es wird ihm dadurch eine wesentliche Dimension genommen: seine Funktion bei der Exploration von neuen Wissensfeldern; auch seine konstruktive Rolle bei der Darstellung von Phänomenen bleibt ausgeblendet“ (Rheinberger, 2013, S. 61). Die bedeutende Frage, wie denn zu prüfende, möglichst produktive Hypothesen entstehen und entwickelt werden, wird in Karl Poppers *Logik der Forschung* folgenreich in einen separierten Zweig der Erkenntnispsychologie delegiert – und ist dezidiert nicht Gegenstand seiner Theorie (vgl. Popper, 2005, S. 7; Rheinberger, 2013, S. 59).

Experimente sind viel mehr, so könnten wir Rheinbergers Gedanken fortsetzen, als bloße Überprüfungsinstanzen für Hypothesen und Theorien. Sie sind künstliche Orte der Hervorrufung, der Präparation von Phänomenen, sie sind Handlungskontexte, in denen der Umgang mit Phänomenen möglich wird, in welchen sich uns deren Widerständigkeit zeigt (vgl. Gutmann, 2017, 225 ff.). Sie sind also gleichsam „ways of worldmaking“, denn sie können – wenn sie gut sind – nicht nur zu neuen Ergebnissen führen, sondern auch zu neuen Formen experimenteller Praxis.

Aus diesen Gründen wirkt die schlichte Opposition von *Induktion* und *Deduktion* so ungenügend, um eine genauere begriffliche Fassung von Erkenntnisprozessen zu schaffen – experimentelle Erfahrung und Erkenntnisgewinn sind vielmehr ein (hermeneutisches) Wechselspiel von Einzelbeobachtungen, Vermutungen und Abstraktionen, dass mit dem Kantischen Begriff der *Urteilstkraft* (bestimmende und reflektierende) oder auch mit dem Begriff *Abduktion* von Charles Peirce (vgl. Nöth, 2000, S. 67–70) gefasst werden kann: Wir versuchen, einzelnes begrifflich zu bestimmen und es zu erklären, indem wir es als Beispiel einer Regel zu interpretieren suchen, und wir haben Kenntnis von Gesetzen und halten Ausschau nach deren konkreter Gestalt. Urteile und Entscheidungen fallen auf vielfältige Weise im Labor – den Versuchsaufbau, den gelingenden oder nicht gelingenden Versuchsablauf, das technische Gerät und die Daten(-Interpretation) betreffend. Und es ist davon auszugehen, dass das Lernen im Labor darauf zielt, eine gemeinsame Praxis aufzubauen, eine gemeinsam geteilte Urteilsbildung einzuüben, was zugleich mögliche kreative Ansätze befeuern, aber auch beschneiden oder gar ausschließen kann. *Habituelle Einübung* heißt (aristotelisch zirkulär beschrieben), dass gute Labortätige *das tun*, was *gute* Labortätige tun. Die sprachliche Darstellung und Thematisierung von einzuübenden *Konventionen* ist leicht, wenn sie Festlegungen betreffen: Wozu dient üblicherweise der rote und wozu der blaue Stecker? Ungleich schwieriger zu fassen, doch ungleich bedeutsamer sind andere Fragen, bei denen es um strittige Urteilsbildung geht: Wann halten wir einen Versuch für gelungen – und was ist mit ihm aufgewiesen? Welche Fehlertoleranz ist bei der Auswertung üblich? Wie lange darf ein erfolgloser Ansatz variiert und erprobt werden? Diese Fragen sind auch deshalb nur mühsam zu bearbeiten, da sie auf Entscheidungsprozesse zielen, die womöglich dem eigenen positivistischen, auf ‚Objektivität‘ zielenden Selbstverständnis zuwiderlaufen.

Das Zusammenspiel von praktischem Vermögen und gedanklicher Leistung stellt Ludwik Fleck heraus: „Alle Experimentalforscher wissen, wie wenig ein Einzelexperiment beweist und zwingt: es gehört dazu immer ein ganzes System der Experimente und Kontrollen, einer Voraussetzung (einem Stil) gemäß zusammengestellt, und von einem Geübten ausgeführt. Eben diese Voraussetzungsvermögen und die Übung, manuelle und gedankliche, bilden zusammen mit dem ganzen experimentellen und nicht experimentellen, sowohl mit dem klargefaßten wie auch mit dem unklaren, ‘instinktiven’ Wissensbestandes eines Forschers das, was wir Erfahrung nennen wollen“ (Fleck, 1980 S. 126).

6 Das Labor im Zentrum der Wissenschaft

Der Marginalisierung oder Unterordnung des Labors durch abstrakte Wissenschaftstheorie stehen gegenläufige wissenschaftstheoretische Ansätze entgegen. Eine genuine Stellung und Bedeutung des Labors kann betont werden, indem die abstrakte Aufspaltung von Theorie und Praxis befragt wird, die gerade im Labor sinnfällig hin-fällig wird: „Statt der bekannten Entfremdung zwischen Theorie und Praxis finden wir im Labor eine Mischung von Handlung und Kognition, auf die der traditionelle Begriff der Theorie nicht mehr adäquat angewendet werden kann“ (Knorr Cetina, 2016, S. 25).

Das Labor ist gewiss nicht *autark*, sondern von vielfältigen Faktoren abhängig, aber es kann dennoch *autonom* genannt werden. „Die Experimentiertätigkeit führt eine Vielzahl von Eigenleben“ (Hacking, 1996, S. 276). In der deutschsprachigen Tradition sind hierzu Arbeiten von Hugo Dingler und Ludwik Fleck hervorzuheben. In der englischsprachigen Tradition ergibt sich, anknüpfend an die Arbeiten von Charles Peirce und John Dewey, ein pragmatischer Ansatz, der auch in diesem Bereich zu einem *Pragmatic turn* und zu einem *Neuen Experimentalismus* geführt hat, der besagt: Wer verstehen will, rekonstruieren will, *wie* Wissenschaft *funktioniert*, muss konkret beobachten, *wie* Akteure im Labor *handeln*. Fragen der naturwissenschaftlichen Empirie, der Interpretation von Messdaten und der Technologieabhängigkeit der Wissenschaft rücken damit in den Vordergrund. Die Erforschung der Laborpraxis soll grundlegende wissenschaftstheoretische Probleme lösen.

Eine dabei stets wichtige und neue Forschungsimpulse auslösende Unterscheidung betrifft den Wissensbegriff, da auf Grundlage dieser Differenzierungen spezifisches Handlungswissen und Urteilsvermögen Profil gewinnen: Die auf Gilbert Ryle (1979) zurückgehende Unterscheidung von *Knowing that* (abstraktes und artikuliertes Wissen) und *Knowing how* (konkretes, nicht leicht zu artikulierendes Handlungswissen) – und auch die daran anknüpfende Unterscheidung von *explizitem* und *implizitem* Wissen (vgl. Polanyi, 2016).

Statt sich abschließend auf eine Position zur Relevanz des Labors festzulegen, kann es sinnvoller sein, das Labor in seinem Selbstbewusstsein zu stärken, aus der wissenschaftstheoretischen Defensive zu befreien und die offene Vielfalt der Forschungs- und Entdeckungsprozesse wahrzunehmen: „Es gibt einige gründliche experimentelle Forschungen, die ausschließlich von der Theorie herkommen. Manche bedeutenden Theorien gehen aus vortheorietischen Experimenten hervor. Etliche Theorien verschmachten, weil das Zusammenspiel mit der wirklichen Welt ausbleibt, während einige experimentelle Phänomene müßig bleiben, weil es an einer Theorie mangelt“ (Hacking, 1996, 265).

Eine besonders starke These wird von dem Wissenschaftstheoretiker Peter Ja-nich vertreten, der an den Konstruktivismus der Erlanger und Konstanzer Schule (und damit auch an Hugo Dingler) anknüpft (vgl. Wille, 2015). Labore bildeten danach weiterhin den zentralen Ort und antreibenden Motor der Naturwissenschaften; Labor und Technik bieten demnach erst die Grundlage, über das zu sprechen, was

nicht Technik sei: „Nur Technik, also das handwerkliche und ingenieurmäßige Können der Experimentatoren bringt die Natur in den Naturwissenschaften zum Sprechen. Und nur wo ein solches technisches Bewirkungswissen zur Verfügung steht, kann dann über Nichttechnisches, d.h. Natürliches im Sinne des vom Menschen nicht Erzeugten gesprochen werden [...]“ (Janich, 1997, S.103 f.). Nicht nur, dass die Wissenschaftstheorie zu sehr an sprachlichen Äußerungen orientiert sei – und hierbei einzig *beschreibende* sprachliche Äußerungen im Blick habe, während es auch Anweisungen und Aufforderungen v.a. bei Experimenten gebe – nicht nur diese (gleich doppelt) verengte Sprachzentrierung wirft Janich der Wissenschaftstheorie vor, sondern auch, dass sie die Perspektive der relevanten Akteure in den Laboren übergehe: ihr Handeln, ihr Handlungswissen, ihre Interessen und ihren kulturellen Hintergrund.

Die *Bionik* kann auf den ersten Blick gegen Janichs These angeführt werden, sofern die Verhältnisse umgekehrt scheinen: Natur wird hier zum Vorbild technischer Gestaltung erhoben; Technik eifere dem nach, was in der Natur längst existiere. Um dies aber sagen zu können, bedarf es schon der Beschreibung des vermeintlichen Vorbilds durch die technische Biologie: Das Lebewesen muss auf die Normalform einer technischen Lösung gebracht werden – und *diese* wird dann zum bionischen Vorbild. Übersieht man diese perspektivierende Investition, muss Natur als „der beste Ingenieur“ erscheinen, was zugleich eine Naturteleologie hervorbringt, die für kreationistische Ansätze anfällig wird.

Dies führt zu der weiteren Frage, warum eigentlich naturwissenschaftliche Theorien so gut auf die Welt zu passen scheinen. Neben der konventionalistischen Antwort, die z. B. Messvorschriften dafür verantwortlich macht, und der realistischen, die in der getreuen Abbildung einer unabhängig von uns bestehenden Realität die Aufgabe und Güte der Wissenschaften erblickt, lässt sich Immanuel Kants Gedanke konstruktivistisch aufgreifen, dass wir die geordnete Struktur der Welt (Raum, Zeit, Kausalität, Identität u. a.) stets in diese erst hineintragen und nicht umhinkommen, sie in dieser Ordnung anzuschauen. Doch auch, wenn man nicht die Anschauungs-, sondern die Handlungsform stark machte, um die Gesetzmäßigkeit der Welt zu garantieren, bleibt ein Unbehagen. Denn das Verständnis laborgestützten Handelns sollte weder den Bezug zum Eigensinn der Objekte verlieren und einzig in der Immanenz eigenen Handelns und Deutens verbleiben, noch darf es sich als fraglos an einer gegebenen Realität orientiert sehen. So wenig wie das Experiment einfach einen Ausschnitt der Realität erschließt, stellt es nur eine instrumentelle Verlängerung quasi industrieller Fertigung dar. In manchem gleicht die experimentelle Befassung mit Phänomenen eher einem iterativen Aushandlungsprozess, an welchem Widerständigkeit und Eigensinn des Gegenstandes ebenso beteiligt sind wie Erfahrungen und Vorannahmen der Experimentierenden, ihre Einbindung in wissenschaftspraktische und -theoretische Traditionen – aber auch die Bereitschaft, nicht so sehr das zu sehen, wonach sie suchen, als eher das, was sich zeigt (zu diesem iterativen Aspekt von Präparation, Experiment, Modellierung und Theorie am Beispiel der Biologie vgl. Gutmann & Nick, 2019).

Ein Experiment ist demnach nie einfach nur eine Ansammlung von Apparaturen – erst die Intentionen der Laborierenden und ihre jeweiligen Theoriekontexte erlauben die (Re-)Konstruktion des Experiments sowie die Deutung seiner Resultate. Mit der Einbeziehung der Theorie, ihrer Abstraktionen und Idealisierungen, kommt es aber zugleich zu einer eigentümlichen Blickumkehr: So sehr der Ausgangspunkt im lebensweltlichen Handeln liegen mag, so radikal entfernt die Laborpraxis sich von diesem: Idealisierung erlaubt es, das Wirkliche als *bloße* Möglichkeit eines Idealen vorzustellen, das dieser Wirklichkeit nicht einfach entnommen werden kann. In der freien und doch zielorientierten Wahl und Entwicklung eines solchen Gesichtspunkts (*point of view*) liegt ein allgemeines und notwendiges Bestimmungsmoment von Wissenschaft, das über die Laborpraxis hinausreicht. Sowenig, wie es vollständig glatte Oberflächen gibt, sowenig existieren Massepunkte oder geradlinig gleichförmige Bewegungen. Als Idealisierung gestatten sie es uns aber, *alltägliche* Vorgänge als bloße Fälle idealer Gesetzmäßigkeiten zu verstehen, wie etwa bei der ballistischen Rekonstruktion einer Kugelflugbahn oder der Abläufe eines Verkehrsunfalls. Das Alltägliche wie das Natürliche werden im Lichte experimenteller Erfahrung und ihrer Idealisierung ausgelegt. Genau dies kennzeichnet den Anfang der neuzeitlichen experimentellen Praxis, denn bei Galileo Galilei finden wir angesichts seiner Bemühungen um die mathematische Erfassung der Fallgesetze einerseits eine handwerkliche Dimension bei der Gestaltung der Fallrinne, andererseits das Gedankenpiel, wie Objekte im Vakuum (seinerzeit theologisch und philosophisch tabuisiert) fallen würden, ohne ein Vakuum technisch überhaupt herstellen zu können (vgl. Cohen, 2010, S. 78 f., S. 114 f.).

7 Labor im Fortschritt

„Wer sagt denn, daß die Welt schon entdeckt ist?“, fragt Peter Handke (Handke, 1978, S. 81). In der Tat motiviert das Bewusstsein von Unentdecktem, Unbeschriebenem, die Vorstellung unerforschter oder ungeklärter Bereiche, das eigene forschende Handeln. Zu dem Selbstverständnis des Labors gehört die Frage, welche innovative Funktion ihm im System der Wissenschaft heute zugeschrieben werden kann, aber auch die Frage, wie gesichert die bisherigen Kenntnisse der Naturwissenschaften sind. Das *Selbstverständnis* hat Auswirkungen auf die *Motivation* der Akteure. Diese kann aus der Vorstellung bezogen werden, auf der Schulter von Riesen zu stehen, Erbe eines bewunderungswürdigen, sicheren, stetig gewachsenen Wissensstandes zu sein. Dieses Selbstbewusstsein unterstreicht beispielsweise Holm Tetens: „Das Tatsachenwissen über alle Wirklichkeitsausschnitte, mit denen es die Wissenschaften zu tun haben, wächst, und schon lange wächst es exponentiell. Noch nie wusste die Menschheit so viel wie gegenwärtig [...]“ (Tetens, 2013, S. 71). Wenn auch keine Theorie „perfekt“ und das Erkenntnisinteresse nur ein „Ideal“ sei, das die Wissenschaften anleite, so seien die empirischen Erfolge doch so enorm, dass erkenntnistheoretische Vorbehalte „oftmals nur noch akademisch“ (Tetens, 2013, S. 67)

seien. Ob allerdings technischer Erfolg als Beleg für die Gültigkeit einer Theorie gewertet werden kann, ist fraglich: „Schließlich kann kein erkenntnistheoretisches Argument ausschließen, daß eine Technologie auf Grund einer falschen Theorie konstruiert wird und trotzdem funktioniert“ (Luhmann, 1991, S. 262). Sowenig experimentelle Erfahrung ohne Standardisierung und Kontrolle der technischen Basis denkbar ist, sowenig sind Standardisierung und Kontrolle allein schon wissenschaftliches Wissen (vgl. Gutmann & Nick, 2019). Ein gelingender experimenteller Ablauf ist nicht schon Garant für Erkenntnisgewinn. Die auf kumulativen Fortschritt abzielende Unterstellung einer ununterbrochenen Wissensentwicklung, wie Tetens sie andeutet, folgt einem durchaus autoritären Narrativ: Die unzähligen Experimente, die erfolglos blieben, deren Daten im Theoriegebäude keinen Anschluss fanden, werden hier ebenso ausgeblendet wie die nicht weniger zahlreichen Theorien, Modelle und Hypothesen, die ohne Resonanz blieben. Was im Rückblick als mehr oder minder glatter Verlauf aussieht, entpuppt sich bei genauerer Betrachtung als verschlungener Pfad des Wissensgewinns, der erstaunliche Kontinuitäten ebenso sehen lässt wie schroffe Abbrüche, Umwege und Eliminationen.

Ein großer Teil etwa der heutigen Physik *kann* als gesichertes Wissen beschrieben werden. Diese nachvollziehbare Position weckt aber auch Zweifel: Wann glaubte man nicht, sich von früheren Zeiten abgrenzen zu dürfen, weil man es „so herrlich weit gebracht“ habe? Wann hielt man nicht die wichtigsten Anliegen für mehr oder weniger geklärt? „Um 1900 herrschte die Vorstellung vor, die Physik sei ihrer Vollendung nahe. Die grundlegenden Naturgesetze seien entdeckt und nur wenige Lücken noch zu schließen“ (Carrier, 2017, S. 144). Welche Überraschungen und Konzeptwechsel haben sich seitdem vollzogen? Wäre es überhaupt wünschenswert, nahezu am Ende der Wissenschaftsgeschichte zu stehen? Wenn Theorien wesentlich durch einen *Wirklichkeitsausschnitt* bestimmt sind, den sie zu beschreiben beanspruchen, so ist die schwierige Frage nach der zu benennenden Grenze dieses Ausschnitts sogleich aufgeworfen. Überdies ist die räumliche Metapher des ‚Wirklichkeitsausschnitts‘ hilfreich, suggestiv und irreführend zugleich. So wird man nicht bestreiten, dass die zunächst plausible Unterscheidung von Mikrokosmos und Makrokosmos (entsprechend: Teilchenphysik und Astrophysik) wieder schwierig wird, wenn wir zugestehen, dass die Objekte der Astrophysik wohl so beschaffen sein dürften, dass sie zugleich Gegenstand der Teilchenphysik sein könnten. Gibt es nicht auch zu einzelnen Wirklichkeitsausschnitten konkurrierende Theorien? Wenn ja, nach welchen Kriterien ist eine Wahl zu treffen?

Eine wissenschaftliche Disziplin kann sich über einen statischen *Fragenkatalog* beschreiben, gleichsam eine hausinterne *To-do*-Liste, die schrittweise abgearbeitet wird. Diese Form der Beschreibung behält etwas Äußerliches, da jede klärende Antwort unvermeidlich unter dem Vorbehalt notwendiger Korrektur steht, da aber auch jeder Ansatz einer *Antwort* weiterführende *Fragen* durch disziplininterne und disziplinübergreifende Effekte auslösen kann. Der Fortschritt angesichts einer (vorläufigen) Antwort besteht womöglich oft nur in der gewonnenen Fähigkeit, weiterführende Fragen besser, präziser stellen zu können.

8 Fazit – Folgerungen für die Labordidaktik

Labortätigkeit ist stets mit einem impliziten und expliziten *Selbstverständnis* verknüpft – wozu sicher auch das des *Ingenieurwissenschaftlers* oder *Wissenschaftsingenieurs* gehört, dem es zu gelingen scheint, dem Baconschen Ideal der Naturbeherrschung folgend, der Natur ihre Geheimnisse zu entreißen. Dieses Selbstverständnis wird angesichts der Skizze erkenntnistheoretischer Positionen herausgefordert. Eine explizite oder performative Positionierung ist angesichts der vorhandenen – und hier nur angedeuteten – Pluralität unvermeidlich. Ob eine kohärente Position interpersonell (etwa innerhalb eines Labors) und intrapersonell vorausgesetzt werden kann (im Sinne einer individuellen kohärenten Einstellung der jeweils Forschenden), ob sie gefordert oder geschaffen werden kann, wäre zu prüfen. Immerhin wäre es plausibel, wenn einzelne von der *Motivation* getrieben werden, endlich zu begreifen, „was die Welt im Innersten zusammenhält“, und doch gleichzeitig sich eingestehen müssen, einzig fehleranfällige Modelle zum Umgang mit Daten zu bieten, die mit der Fachwissenschaft intersubjektiv diskutiert und interpretiert werden müssen – im Lichte vorausgesetzter Theorien, Modelle und Annahmen. Dem realen Erkenntnisdrang steht in einem spannungsreichen Wechselspiel die notwendige Skepsis gegenüber. Ambiguitätstoleranz, Gelassenheit und Ironie sind hier vermutlich als Einstellung und Haltung gefordert, um diese Spannungen bewusst und produktiv auszutragen (vgl. Berendes, 2014, S. 248).

In einem stark gesteuerten Lernlabor erscheint alles definiert: Solides, als gesichert geltendes Wissen wird vermittelt, und Handlungsfähigkeiten bzw. Kompetenzen bei den Lernenden werden aufgebaut und erweitert. Wird der wissenschaftliche und technische Rahmen eines Lernlabors so definiert, gewissermaßen statisch, ist die einzig anerkannte Unbekannte im Lernlabor das Lernverhalten der Studierenden. Das Lernlabor ist, so gesehen, der optimale Ort zur Verhaltensbeobachtung, der optimale Ort zur Beurteilung und Bewertung individueller Lernprozesse. In einem mit Blick auf die technischen Prozesse überraschungsfreien Lernlabor ist das einzig erwartete Ereignis der möglichst getreue Handlungs- und Deutungsnachvollzug durch die Lernenden. Die Grenze zwischen Forschungslabor und Lehrlabor ist aber bekanntlich bereits durch innovative didaktische Ansätze, insbesondere zum *Problembasierten Lernen* (PBL), *Projektorientierten Lernen* (POL) und *Forschenden Lernen*, in Frage gestellt (vgl. Tekkaya u. a., 2016, S. 35; grundsätzlich: Huber & Reinmann, 2019). Stellen wir nun ergänzend die erkenntnistheoretische Frage nach der Bedingung der Möglichkeit naturwissenschaftlicher Erkenntnis, kann dies möglicherweise diese Ansätze zusätzlich stärken und fördern. Denn einerseits dürfen wir bezweifeln, dass die technische Überraschungsfreiheit des Lernlabors erkenntnistheoretisch aufrechtzuerhalten ist, und andererseits wird vermutlich deutlich, welches Wissen, welche Debatten und welche Kompetenzen im Laborkontext erforderlich sind.

Wenn Studierende im Rahmen eines wissenschaftlichen Studiums ein Labor betreten, so ist diese Lehrveranstaltung (von innen wie von außen) so zu kontextualisieren – wie das Labor. Sie sollen wissen können, wo sie sind und was sie tun, wenn

sie im Labor tätig werden. Es bedarf dabei der diskursiven und streitbaren Orientierung, was ein Labor im Rahmen der Wissenschaft heute leisten kann, wie und welche Arten von Erkenntnissen dort zu gewinnen sind und welchen Sinn und Zweck das Nachvollziehen standardisierter Versuche noch haben kann. Aus diesen erst zu klärenden Überzeugungen und erkenntnistheoretischen Prämissen leiten sich die *Lernziele* für Laborveranstaltungen und die Verankerung des Lernlabors im Studienverlauf ab – und schwierig dürfte es sein, Lernziele für das Lernlabor zu formulieren, ohne sich dabei, wissentlich oder nicht, auch erkenntnistheoretisch festzulegen. Aus der Geschichte der Naturwissenschaften – einer nicht selten stilisierten Helden-geschichte – kann Motivation gewonnen werden; doch ebenso ist berechtigter Antrieb in der Vorstellung zu finden, längst nicht am Ende einer Entwicklung zu stehen, sondern potentiell hier und jetzt etwas Überraschendes geschehen zu lassen. Studierende haben etwa vierzig Jahre Berufsleben vor sich. Wäre es daher nicht angebracht, sie auch auf einen künftigen Wandel in Wissenschaft und Technik einzustellen, indem ihnen im Studium diese basale streitbare Dynamik um den Erkenntnisbegriff in der Wissenschaft eröffnet wird? *Lebenslanges Lernen* sollte ihnen möglichst nicht Anpassungsdruck im zugemuteten Wandel bedeuten, sondern es sollte mit dem Wunsch und der Fähigkeit verknüpft sein, gestaltend und reflektiert am Wandel mitzuwirken.

Literaturverzeichnis

- Arendt, H. (1989). *Vita Activa* oder Vom tätigen Leben. 6. Aufl. München: Piper.
- Berendes, J. (2014). Eine Frage der Haltung? Überlegungen zu einem neuen (und alten) Schlüsselbegriff für die Lehre. In Rentschler, M. & Metzger, G. (Hrsg.), *Perspektiven angewandter Hochschuldidaktik: Studien und Erfahrungsberichte*. (Report – Beiträge zur Hochschuldidaktik 44., S. 229–257). Aachen: Shaker.
- Bruchmüller, H.-G. & Haug, A. (2001). *Labordidaktik für Hochschulen. Eine Einführung zum Praxisorientierten Projekt-Labor* (Schriftenreihe report 40). Alsbach: Leuchtturm-Verlag.
- Carnap, R. (1998). *Der logische Aufbau der Welt*. Hamburg: Meiner.
- Carrier, M. (2017). *Wissenschaftstheorie zur Einführung*. 4. überarb. Aufl. Hamburg: Junius.
- Cohen, F. (2010). *Die zweite Erschaffung der Welt. Wie die moderne Naturwissenschaft entstand*. Aus dem Niederländischen von A. Ecke und G. Seferens. Frankfurt a. M.: Campus.
- Dingler, H. (1928). *Das Experiment. Sein Wesen und seine Geschichte*. München: Ernst Reinhardt.
- Feyerabend, P. (1993). *Wider den Methodenzwang*. 4. Aufl. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
- Fleck, L. (1980). *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache. Einführung in die Lehre vom Denkstil und Denkkollektiv*. Mit einer Einleitung hrsg. v. L. Schäfer u. Th. Schnelle. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.

- Franuszkiewicz, J. u. a. (2019). Flexibles und selbstorganisiertes Lernen im Labor – Remote-Labore in der Hochschullehre. *ZFHE* Jg. 14/3 (November 2019), 273–285.
- Gutmann, M. (2017). *Leben und Form*. Berlin: Springer.
- Gutmann, M. & Nick, P. (2019). Modellbildung. In Nick, P. u. a. (Hrsg.). *Modellorganismen* (S. 199–242). Berlin: Springer.
- Hacking, I. (1996). *Einführung in die Philosophie der Naturwissenschaften*. Aus dem Englischen übersetzt von J. Schulte. Stuttgart: Reclam.
- Handke, P. (1978). *Die Stunde der wahren Empfindung*. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
- Huber, L. & Reinmann, G. (2019). *Vom forschungsnahen zum forschenden Lernen an Hochschulen*. Wege der Bildung durch Wissenschaft. Wiesbaden: Springer.
- Hume, D. (2015). *Eine Untersuchung über den menschlichen Verstand*. Übers. v. R. Richter. Mit einem Nachwort v. M. Kühn. Hamburg: Meiner.
- Jaeger, L. (2015). *Die Naturwissenschaften*. Eine Biographie. Heidelberg: Springer.
- Janich, P. (1995). Experiment. In Mittelstraß, J. *Enzyklopädie der Philosophie und Wissenschaftstheorie* (Bd. 1. A-G. S. 621–622). Stuttgart, Weimar: Metzler.
- Janich, P. (1997). *Kleine Philosophie der Naturwissenschaften*. München: C. H. Beck.
- Janich, P. (2015). *Handwerk und Mundwerk*. München: C. H. Beck.
- Kant, I. (1956). *Kritik der reinen Vernunft*. In *Werke in sechs Bänden*. Hrsg. v. W. Weischedel. Bd. 2. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Kant, I. (1957). *Kritik der Urteilskraft*. In *Werke in sechs Bänden*. Hrsg. v. W. Weischedel. Bd. 5. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Knorr Cetina, K. (2016). *Die Fabrikation von Erkenntnis. Zur Anthropologie der Naturwissenschaft*. Mit einem Vorwort v. R. Harré. Erweiterte Neuauflage. 4. Aufl. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
- Kuhn, T. S. (1989). *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*. 2., rev. u. um das Postskriptum von 1969 erg. Aufl. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
- Luhmann, N. (1991). *Die Wissenschaft der Gesellschaft*. 2. Aufl. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
- Nöth, W. (2000). *Handbuch der Semiotik*. 2. Aufl. Stuttgart, Weimar: Metzler.
- Polanyi, M. (2016). *Implizites Wissen*. Übersetzt v. H. Brühmann. 2. Aufl. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
- Popper, K. (2005). *Logik der Forschung*. 11. Aufl. Hrsg. v. Herbert Keuth. Tübingen: Mohr.
- Popper, K. (1984). *Objektive Erkenntnis. Ein evolutionärer Entwurf*. 4. verb. und erg. Aufl. Hamburg: Hoffmann und Campe.
- Rheinberger, H.-J. (2001). *Experimentalsysteme und epistemische Dinge. Eine Geschichte der Proteinsynthese im Reagenzglas*. Göttingen: Wallstein.
- Rheinberger, H.-J. (2013). *Historische Epistemologie zur Einführung*. 3. Aufl. Hamburg: Junius.
- Ryle, G. (1978). *Der Begriff des Geistes*. Übers. v. K. Baier. Stuttgart: Reclam.
- Stegmüller, W. (1978). *Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie. Eine kritische Einführung*. Bd. 1. 6. Aufl. Stuttgart: Kröner.
- Tetens, H. (1987). *Experimentelle Erfahrung*. Hamburg: Meiner.
- Tetens, H. (2013). *Wissenschaftstheorie*. Eine Einführung. München: C. H. Beck.

- Tekkaya, A. E. u. a. (2016). *Das Labor in der ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung*. Zukunftsorientierte Ansätze aus dem Projekt IngLab. (acatech STUDIE) München: utzverlag.
- Terkowsky, C. u. a. (2019). Online engineering education for manufacturing technology: Is a remote experiment a suitable tool to teach competences for „Working 4.0”? *European Journal of Education*. 17 October 2019. DOI: 10.1111/ejed.12368 Verfügbar unter: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ejed.12368> (Zugriff am 26.4.2020)
- Wille, M. (2015). Die Disziplinierung des Denkens. Wilhelm Kamlahs und Paul Lorenzens Logische Propädeutik. In Pörksen, B. (Hrsg.): *Schlüsselwerke des Konstruktivismus* (2., erweit. Aufl., S. 149–163). Wiesbaden: Springer.